



TiO₂掺量对Sc₂O₃-CeO₂共稳定ZrO₂热力学性能的影响

王迎辉, 陈梦迪, 李昌治, 王进双, 井强山

引用本文:

王迎辉, 陈梦迪, 李昌治, 王进双, 井强山. TiO₂掺量对Sc₂O₃-CeO₂共稳定ZrO₂热力学性能的影响[J]. 信阳师范学院学报自然科学版, 2022, 35(3): 381-386. doi: 10.3969/j.issn.1003-0972.2022.03.007

WANG Yinghui, CHEN Mengdi, LI Changzhi, WANG Jinshuang, JING Qiangshan. Effect of TiO₂ Content on Thermodynamic Properties of Sc₂O₃-CeO₂ Co-stabilized Zirconia[J]. Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition), 2022, 35(3): 381-386. doi: 10.3969/j.issn.1003-0972.2022.03.007

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-0972.2022.03.007>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

Dy₂O₃改性YSZ相稳定性及熔盐腐蚀行为

Phase Stability and Molten Salt Corrosion Behavior of YSZ Modified by Dy₂O₃

信阳师范学院学报自然科学版, 2020, 33(1): 112-117. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-0972.2020.01.019>

改性Pechini法制备BaTi₂O₅陶瓷及其优异电学性能研究

Research on Excellent Electrical Properties of BaTi₂O₅ Ceramics Prepared by a Modified Pechini Method

信阳师范学院学报自然科学版, 2022, 35(2): 280-284. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-0972.2022.02.018>

极化工艺对压电储能Ba_{0.96}Sr_{0.04}TiO₃陶瓷铁电性和场致应变的影响机制

The Influence Mechanism of Polarization Process on Various Ferroelectricity and Field-induced Strain for Piezoelectricity and Energy Storage of Ba_{0.96}Sr_{0.04}TiO₃ Ceramics

信阳师范学院学报自然科学版, 2021, 34(3): 467-471. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-0972.2021.03.021>

不同NiCo₂O₄晶体形貌对其超电容性能的影响

Influence of Different Morphologies on the Supercapacitive Performance of NiCo₂O₄ Particles

信阳师范学院学报自然科学版, 2021, 34(1): 99-104. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-0972.2021.01.016>

单原子合金催化剂热稳定性的反应力场分子动力学研究

Reactive Force Field Model Molecular Dynamics Study on the Thermal Stability of Single Atom Alloy Catalysts

信阳师范学院学报自然科学版, 2020, 33(2): 191-197. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-0972.2020.02.004>

DOI:10.3969/j.issn.1003-0972.2022.03.007

文章编号:1003-0972(2022)03-0381-06

TiO₂ 掺量对 Sc₂O₃-CeO₂ 共稳定 ZrO₂ 热力学性能的影响

王迎辉,陈梦迪,李昌治,王进双*,井强山*

(信阳师范学院 河南省豫南非金属矿资源高效利用重点实验室,河南 信阳 464000)

摘要:采用高温固相合成法制备了一系列 Ti_xSc_{0.08}Ce_{0.08}Zr_{0.84}O_{1.96+2x} (x=0.01,0.03,0.05,0.07,0.09) (TSCZ)陶瓷材料。利用 XRD 分析该材料的物相结构及在 1500 °C 不同合成时间(12、50、100 h)下的相稳定性,用热膨胀仪测量热膨胀系数,用维氏硬度计分析力学性能。结果表明,制备的 TSCZ 材料具有亚稳态四方相(t')。经过 1500 °C 高温热处理 100 h 后,材料仍然保持稳定的 t' 结构。随着 TiO₂ 掺量的增加,该材料的热膨胀系数、硬度、断裂韧性和抗烧结性能降低,杨氏模量增加。

关键词:高温固相合成;TiO₂ 掺量;热物理性能;力学性能

中图分类号:O642.5;TS936

文献标识码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effect of TiO₂ Content on Thermodynamic Properties of Sc₂O₃-CeO₂ Co-stabilized Zirconia

WANG Yinghui, CHEN Mengdi, LI Changzhi, WANG Jinshuang*, JING Qiangshan*

(Henan Key Laboratory of Utilization of Non-metallic Mineral in the South of Henan, Xinyang Normal University, Xinyang 464000, China)

Abstract: A series of Ti_xSc_{0.08}Ce_{0.08}Zr_{0.84}O_{1.96+2x} (x=0.01,0.03,0.05,0.07,0.09) (TSCZ) ceramic materials are prepared by high temperature solid state syntheses. The phase structure and phase stability at 1500 °C for 12 h, 50 h, 100 h are analyzed by XRD, the thermal expansion coefficient of the material is measured by thermal dilatometer, and the mechanical performance is analyzed by vickers hardness tester. The results show that TSCZ materials with metastable tetragonal phase(t') structure are successfully prepared. After 100 h heat treatment at 1500 °C, the materials still maintain a stable t' structure. With the increase of TiO₂ content, the thermal expansion coefficient, hardness, fracture toughness and sintering resistance are declined, and the Young's modulus are increased.

Key words: high temperature solid state syntheses; TiO₂ content; thermophysical properties; mechanical performance

0 引言

热障涂层(TBCs)被广泛应用于提高燃气涡轮发动机的性能和效率^[1-2]。到目前为止,含有氧化钇(质量分数为 6%~8%)的稳定二氧化锆(YSZ)涂层仍然是高温涡轮部件中最常用的 TBCs 材料。YSZ 在 1200 °C 以下是非常稳定的。然而,在 1200 °C 以上工作时,YSZ 会加速烧结和相变,导致其隔热性能和工作寿命受到严重损伤。在下一代先进的涡轮发动机中,需要进一步提高燃气温度以增加

推重比。为了克服 YSZ 性能的不足,开发相稳定性好、抗烧结性能高、低导热性和高热膨胀系数的新型替代陶瓷顶层涂层材料是非常迫切的。

目前,具有低热导性的高温陶瓷材料(例如 La₂Ce₂O₇、Gd₂Zr₂O₇ 和 GdPO₄),被认为是一种潜在的 TBCs 材料^[3-4]。然而,它们的力学性能并不理想。研究者发现另一种基于 ZrO₂ 系统,通过增加稳定剂的浓度,提高 CeO₂、Sc₂O₃ 或稀土氧化物 RE₂O₃ 掺杂 ZrO₂ 的相稳定性和隔热能力^[5-6]。但是,这种方法会使 ZrO₂ 的四方性降低,断裂韧性

收稿日期:2021-12-03;修订日期:2022-01-15;*.通信联系人,E-mail:wangjinshuang88@126.com;9jqshan@163.com

基金项目:国家自然科学基金项目(51902279);信阳师范学院“南湖学者奖励计划”青年项目

作者简介:王迎辉(1988—),男,河南平顶山人,实验员,主要从事陶瓷隔热防腐涂层的研发及应用。

也会随之降低。因此,在保持或者是增加四方性的同时促进相稳定性也是非常重要的。开发能够同时提高相稳定性和四方性的材料成为当前的研究热点。通过掺杂与 Zr^{4+} 相等或更高氧化态的阳离子(如 Ti^{4+} 、 Ta^{5+} 或 Nb^{5+}) 可以提高四方性^[7-9]。不幸的是,所得到的二元固溶体在冷却时会转化为单斜相(m),因此需要采用三元固溶体稳定机制。该机制的可行性已经在 ZrO_2 - $YO_{1.5}$ - TiO_2 ^[10] 和 ZrO_2 - $YO_{1.5}$ - $TaO_{2.5}$ ^[11] 体系中得到了证明。在这些体系中,已经合成了稳定的、不可转化的四方性固溶体,晶格四方畸变增强的铁弹性增韧机制有助于提高断裂韧性,高四方性也提高了相稳定性。然而,该应用受到狭窄的四方组成范围限制,导致较大的工艺挑战。

Sc_2O_3 掺杂的 ZrO_2 体系具有高相稳定性、优异耐腐蚀性^[12]。 CeO_2 掺杂对 ZrO_2 基陶瓷有积极的影响并能提高其相稳定性^[13],是室温下稳定 ZrO_2 的良好掺杂剂。TABATABAEIAN 等^[14] 发现 $0.0478Sc_2O_3$ - $0.2CeO_2$ - ZrO_2 材料在 $1400\text{ }^\circ\text{C}$ 退火 25 h 后仍能保持单一的四方相(t),并且具有良好的热循环寿命。在前期研究中也发现适量的 Sc_2O_3 与 CeO_2 共稳定的 ZrO_2 在 $1500\text{ }^\circ\text{C}$ 退火 100 h 后仍能保持单一的 t 相。同时,研究表明 TiO_2 与 CeO_2 共稳定的 ZrO_2 材料具有高的四方性,并且在 $1300\text{ }^\circ\text{C}$ 下热处理 100 h 仍具有良好的相稳定性^[15]。 TiO_2 掺杂可以提高 SCZ 材料的四方性,有望提高其高温相稳定性。然而, TiO_2 掺量对 Sc_2O_3 - CeO_2 - ZrO_2 体系性能的影响尚不清晰。

本文研究了不同掺量的 TiO_2 掺杂 $Sc_{0.08}Ce_{0.08}Zr_{0.84}O_{1.96}$ (8S8CZ) 化合物,旨在研究 TiO_2 掺量对 8S8CZ 化合物的相稳定性、热膨胀系数(TEC)、力学性能和抗烧结性能的影响。

1 实验部分

1.1 样品的制备

以 Sc_2O_3 、 $Ce(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ 、 TiO_2 、 $ZrOCl_2 \cdot 8H_2O$ (以上均由国药集团化学试剂有限公司生产)为原料制备 TSCZ 陶瓷材料。 Sc_2O_3 和 TiO_2 在 $1000\text{ }^\circ\text{C}$ 下干燥 2 h 以除去二氧化碳和水。采用水热法合成(8S8CZ)材料,称取一定量的 Sc_2O_3 加入硝酸(浓硝酸与水体积比为 1:1)配成 $Sc(NO_3)_3$ 溶液, $Ce(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ 和 $ZrOCl_2 \cdot 8H_2O$ 配成一定浓度的 $Ce(NO_3)_3$ 和 $ZrCl_2$ 溶液。按照化学计量比量取一定体积的 $Sc(NO_3)_3$ 、 $Ce(NO_3)_3$ 和 $ZrCl_2$

溶液于烧杯中,加入一滴聚乙烯醇(PVA,质量分数为 5%),搅拌 30 min 后逐滴加入 NaOH 溶液调节至 $pH=10$ 。继续搅拌 30 min,然后将其倒入反应釜中, $180\text{ }^\circ\text{C}$ 反应 24 h。待反应釜冷却后,打开反应釜,倒掉上清液,用去离子水离心洗涤沉淀。充分干燥后,于 $900\text{ }^\circ\text{C}$ 煅烧 5 h,得到 8S8CZ 的预结晶粉末。

按照化学计量比称取一定量的 8S8CZ 预结晶粉末与 TiO_2 放入球磨罐中,加入球磨珠球磨,将混合均匀的粉末在 $1500\text{ }^\circ\text{C}$ 的高温炉中煅烧 12 h,获得一系列 $Ti_xSc_{0.08}Ce_{0.08}Zr_{0.84}O_{1.96+2x}$ ($x=0.01$ 、 0.03 、 0.05 、 0.07 、 0.09) (TSCZ) 陶瓷材料,分别简记为:1T8S8CZ、3T8S8CZ、5T8S8CZ、7T8S8CZ、9T8S8CZ。

将上述所得到的一系列粉末在 $1500\text{ }^\circ\text{C}$ 下煅烧不同时间,测其相稳定性。称取一定量的粉末放入模具中,在 25 MPa 压力下压制 8 min,得到圆片状预制胚体,并在冷等静压机中于 200 MPa 压力下压制 5 min。最后将预制胚体在 $1500\text{ }^\circ\text{C}$ 的高温炉中煅烧 50 h,得到用于结构分析和性能测试的致密块体材料。

1.2 样品的表征

采用 XRD(日本理学 MiniFlex600 型 X-射线粉末衍射仪)分析样品的晶体结构,放射源为 $Cu/K\alpha$ ($\lambda=1.5406\text{ \AA}$),扫描角度 θ 为 $20^\circ\sim 80^\circ$,扫速为 $10^\circ/\text{min}$,步长 0.02° 。采用 NETZSCH DTL 402C 热膨胀仪测量样品的热膨胀系数,升温速度 $5\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$, N_2 气氛。采用维氏硬度计(VH12022, Wilson)对抛光后的 TSCZ 陶瓷块体材料进行硬度、断裂韧性和杨氏模量的测试,每个样品平行测试 20 个点取平均值。

断裂韧性(K_{IC} , $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)的计算可以根据式(1)进行计算。

$$K_{IC} = 2 \times 0.0319 \times \frac{P}{a\sqrt{L}}, \quad (1)$$

其中: K_{IC} 是维氏硬度值, GPa ; P 是压痕载荷 9.8 N ; a 是两个压痕对角线平均长度的一半, μm ; L 是总径向和裂纹长度, μm 。

杨氏模量(E , GPa)满足式(2):

$$\frac{I'_2}{I'_1} = \frac{I_2}{I_1} - \frac{\alpha H_K}{E}, \quad (2)$$

其中: I_2/I_1 是努氏压头尺寸的比率(1/7.11); I'_2/I'_1 是压痕的对角线长度比; H_K 是努氏显微硬度, GPa ; $\alpha=0.45$ 。

2 结果与讨论

2.1 材料表征

图 1(a) 显示了采用高温固相法合成的 TSCZ 陶瓷材料 (1T8S8CZ、3T8S8CZ、5T8S8CZ、7T8S8CZ 和 9T8S8CZ) 在 $2\theta = 20^\circ \sim 80^\circ$ 区域的 XRD 图谱。图 1(b) 显示了 TSCZ 陶瓷材料 (1T8S8CZ、3T8S8CZ、5T8S8CZ、7T8S8CZ 和 9T8S8CZ) 在 $2\theta = 72^\circ \sim 76^\circ$ 区域的 XRD 图谱。从图中可以看出主相为亚稳态四方相 (t'), 在 $2\theta = 72^\circ \sim 76^\circ$ 区域只有 t' 相的衍射峰, 没有观察到立方相 (c) 的衍射峰。

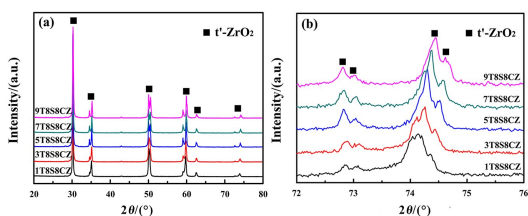


图 1 TSCZ 粉末的 XRD 图

Fig. 1 The XRD patterns of TSCZ powders

根据这 5 种陶瓷材料的 XRD 衍射峰, 计算了其晶格参数, 并列于表 1 中。从表 1 可以看出 TSCZ 陶瓷材料的 c/a 随着 TiO_2 掺量的增加而增大。此外, 也没有检测到 TiO_2 的衍射峰, 说明 TiO_2 已经完全溶解到 SCZ 材料中。

表 1 TSCZ 陶瓷材料的晶胞参数和四方度

Tab. 1 Lattice parameters and Tetragonality of TSCZ ceramic materials

样品	相结构	a/nm	c/nm	c/a
1T8S8CZ	t'	0.510 2	0.519 0	1.017 2
3T8S8CZ	t'	0.509 1	0.519 4	1.020 3
5T8S8CZ	t'	0.508 5	0.519 8	1.022 2
7T8S8CZ	t'	0.508 3	0.520 2	1.023 4
9T8S8CZ	t'	0.508 2	0.520 4	1.024 2

2.2 相稳定性

图 2 显示了 TSCZ 陶瓷材料在 1500°C 下高温处理不同时间 (12、50、100 h) 的 XRD 图谱。从 XRD 图谱中可以看出, 经过 1500°C 高温处理 12、50、100 h 后, TSCZ 陶瓷材料没有发生相转变, 仍然具有稳定的 t' 相结构, 表明 TSCZ 陶瓷材料在 1500°C 高温下具有良好的相稳定性。

图 3 展示了 TSCZ 陶瓷材料在 $2\theta = 72^\circ \sim 76^\circ$ 区域的 XRD 图谱, 从图中可以观察到 t' 相的特征衍射峰 $t'(004)$ 和 $t'(400)$, 并没有观察到 c(400) 的

特征衍射峰, 表明 TSCZ 陶瓷材料经过高温处理后并没有发生稳定剂的偏析。

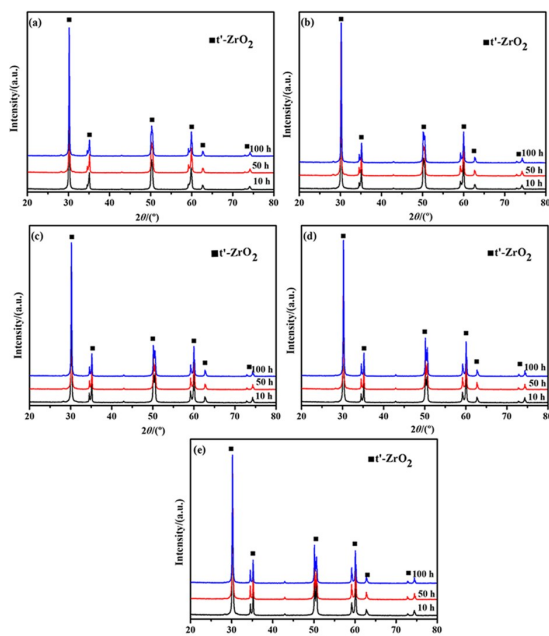


图 2 TSCZ 陶瓷材料经 1500°C 热处理不同时间后的 XRD 图

Fig. 2 The XRD patterns of TSCZ ceramic materials after heat treatment at 1500°C for different time

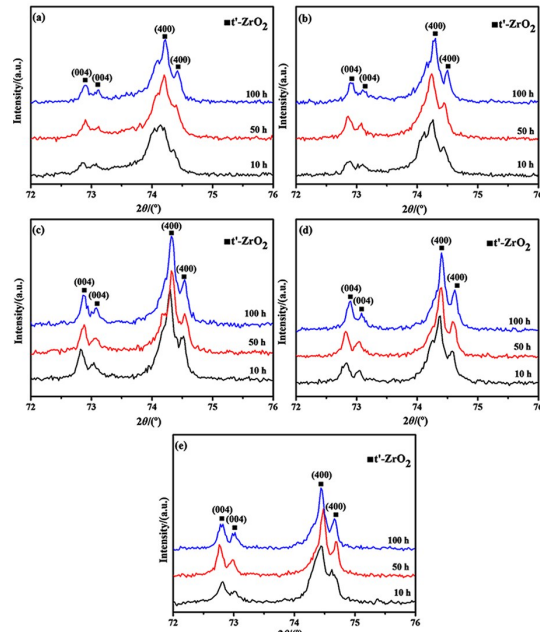


图 3 TSCZ 陶瓷材料经 1500°C 热处理不同时间后 $2\theta = 72^\circ \sim 76^\circ$ 区域的 XRD 图

Fig. 3 The XRD patterns of TSCZ ceramic materials after heat treatment at 1500°C for different time in the area with $2\theta = 72^\circ \sim 76^\circ$

2.3 热膨胀系数 (TEC)

TEC 是用于 TBCs 的一个重要参数。TBCs 体系中的陶瓷涂层需要高的 TEC, 以减少陶瓷涂

层和基底之间的热膨胀不匹配而产生的应力。图 4 显示了 TSCZ 陶瓷材料的 TEC。在 200~1300 °C 的范围内,所有样品的 TEC 都随着温度的升高而逐渐增加。这是因为材料的热膨胀系数与晶格间平均间距有关。随着温度升高,晶格振动逐渐加强,原子间平均间距也随之增大,因此 TEC 逐渐增加。其中,1T8S8CZ 的 TEC 从 $3.27 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 增加到 $9.58 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, 3T8S8CZ 的 TEC 从 $2.92 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 增加到 $9.38 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, 5T8S8CZ 的 TEC 从 $2.66 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 增加到 $9.18 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, 7T8S8CZ 的 TEC 从 $2.66 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 增加到 $9.07 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, 9T8S8CZ 的 TEC 从 $2.55 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 增加到 $8.79 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 。从图 4 中可以看出,随着 TiO₂ 掺量的增加,TEC 逐渐减小。在 TSCZ 陶瓷材料中,1T8S8CZ 的 TEC 最大,但比 YSZ 的 TEC 值 ($10.85 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) 小^[16]。

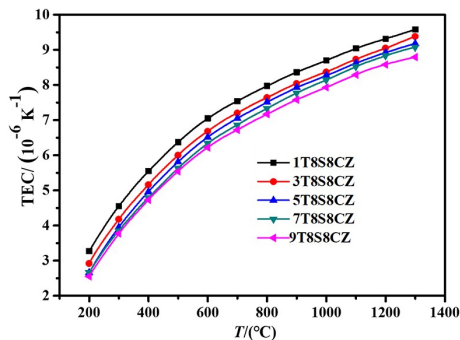


图 4 200~1200 °C 温度范围内 TSCZ 陶瓷材料的热膨胀系数

Fig. 4 TEC of TSCZ ceramic materials within a temperature range from 200 to 1200 °C

众所周知,较低强度的离子键 (I) 和晶格能 (U) 有助于产生较大的 TEC。 I 和 U 分别由下列式(3)和式(4)(波恩-兰德方程)计算:

$$I_{A-B} = 1 - \exp\left(-\frac{1}{4}(x_A - x_B)^2\right), \quad (3)$$

$$U = \frac{N_0 A Z^+ Z^- e^2}{4\pi\epsilon_0 r_0} \left(1 - \frac{1}{n}\right), \quad (4)$$

其中: I_{A-B} 是 A 位正离子和 B 位负离子之间的离子键强度,在本文中代表 A 位正离子 Sc^{3+} 、 Ce^{4+} 、 Zr^{4+} 、 Ti^{4+} 与 B 位负离子 O^{2-} 的离子键强度; x_A 和 x_B 分别是 A 位离子和 B 位离子的平均电负性; U 、 N_0 、 A 、 Z 、 e 、 ϵ_0 、 r_0 和 n 分别表示晶格能、阿伏伽德罗常数、马德隆常数、电子的电荷、离子电荷数、自由空间的介电常数、离子间距离和波恩指数。 Ti^{4+} 、 Sc^{3+} 、 Ce^{4+} 、 Zr^{4+} 和 O^{2-} 的电负性分别为 1.54、1.6、1.12、1.33 和 3.44^[17-19]。在 TSCZ 陶瓷

材料中保持 Sc^{3+} 、 Ce^{4+} 、 Zr^{4+} 含量不变,随着 Ti^{4+} 掺量的增加,电负性差值逐渐变大, I_{A-B} 离子键强度逐渐增强。此外,半径较小的 Ti^{4+} 取代半径较大的 Zr^{4+} 会使离子半径降低, Ti^{4+} 的掺杂也使离子的电荷数增加,从而导致晶格能增加。综上所述,随着 TiO_2 掺量的增加,离子键强度和晶格能增加。因此,TSCZ 陶瓷材料的 TEC 逐渐减小。

2.4 力学性能

图 5 (a) 显示了 TSCZ 陶瓷材料的维氏硬度,1T8S8CZ、3T8S8CZ、5T8S8CZ、7T8S8CZ 和 9T8S8CZ 的维氏硬度值分别为 12.46 ± 0.42 、 11.61 ± 0.31 、 11.42 ± 0.28 、 11.31 ± 0.25 、 $11.25 \pm 0.23 \text{ GPa}$ 。图 5 (b) 显示了 TSCZ 陶瓷材料的断裂韧性,1T8S8CZ、3T8S8CZ、5T8S8CZ、7T8S8CZ 和 9T8S8CZ 的断裂韧性值分别为 2.61 ± 0.25 、 2.47 ± 0.18 、 2.44 ± 0.17 、 2.43 ± 0.16 、 $2.41 \pm 0.14 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

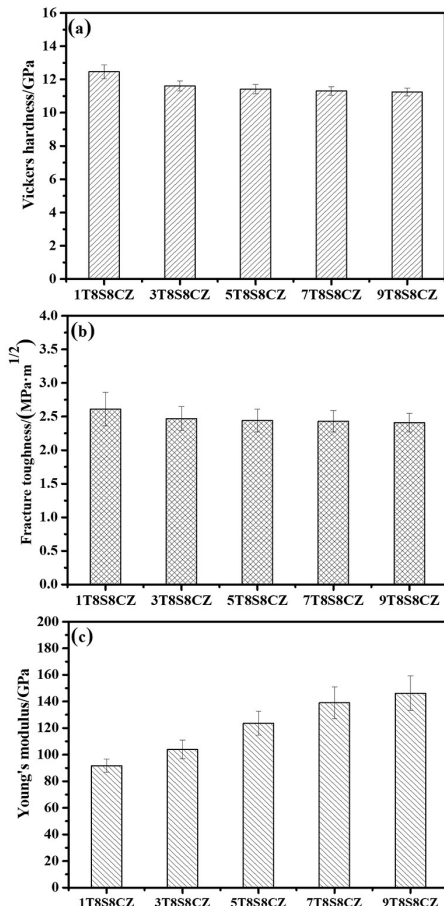


图 5 TSCZ 陶瓷材料的维氏硬度(a)、断裂韧性(b)、杨氏模量(c)

Fig. 5 The vickers hardness (a), fracture toughness (b) and Young's modulus (c) of TSCZ ceramic materials

图 5 (c) 显示了 TSCZ 陶瓷材料的杨氏模量,

1T8S8CZ、3T8S8CZ、5T8S8CZ、7T8S8CZ 和 9T8S8CZ 的杨氏模量值分别为 92 ± 5 、 104 ± 7 、 124 ± 9 、 139 ± 12 、 146 ± 13 GPa。

随着 TiO_2 掺杂量的增加, TSCZ 陶瓷材料的维氏硬度和断裂韧性都有所下降, 杨氏模量增加。高硬度和高断裂韧性能够提高陶瓷材料在实际应用过程中的抗腐蚀性和异物冲击性。在 TSCZ 陶瓷材料中 1T8S8CZ 的维氏硬度和断裂韧性最高, 分别为 12.46 ± 0.42 GPa 和 2.61 ± 0.25 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, 比 8YSZ 的硬度 (9.84 ± 0.29 GPa) 高, 但是断裂韧性与 8YSZ 相当 (2.48 ± 0.46 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)^[10]。杨氏模量与晶格能有关, 当晶格能较低时, 杨氏模量较小。因此, 当晶格能随着 TiO_2 掺量的增加而增加时, 杨氏模量会逐渐增加。在 TSCZ 陶瓷材料中 9T8S8CZ 的杨氏模量最高, 为 146 ± 13 GPa, 比 YSZ 的杨氏模量 (210 ± 10 GPa) 低^[20]。低的杨氏模量可以减少陶瓷材料在涂层中的残余应力。

2.5 抗烧蚀性能

热障涂层的开裂通常与陶瓷顶层涂层的烧蚀和涂层内相关的残余应力有关。此外, 烧蚀还会降低材料的孔隙度, 导致材料的硬度增加。材料的抗烧蚀性能会影响其在高温下的使用寿命, 所以需要对其抗烧蚀性能进行评估。将一定量的粉末倒入模具中预成型和冷等静压后, 分别在不同温度 1100、1200、1300、1400、1500 °C 下高温处理 6 h。如图 6 所示, 随着温度的升高, TSCZ 陶瓷材料的体积收缩率逐渐增加, 1T8S8CZ、3T8S8CZ、5T8S8CZ、7T8S8CZ 和 9T8S8CZ 体积收缩率分别从 0.00% 增加到 0.91%、0.24% 增加到 10.05%、

0.53% 增加到 11.07%、1.24% 增加到 11.74% 和 2.6% 增加到 11.84%。随着 TiO_2 掺量的增加, TSCZ 陶瓷材料的体积收缩率逐渐增加, 抗烧蚀性能降低。然而, 相比于 YSZ 的体积收缩率 ($-1.2\% \sim 19.8\%$)^[15], TSCZ 陶瓷材料的抗烧蚀性能较好。

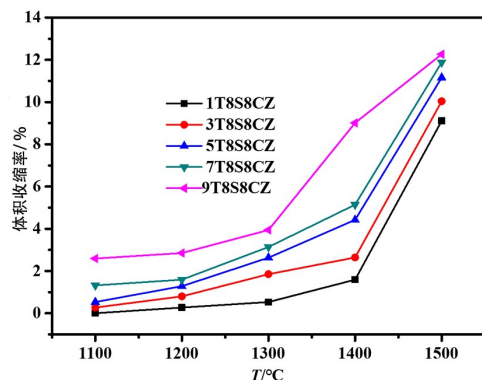


图 6 TSCZ 陶瓷材料的体积收缩率

Fig. 6 The volume shrinkage of TSCZ ceramic materials

3 结论

采用高温固相合成法成功制备了 TiO_2 、 Sc_2O_3 和 CeO_2 共掺杂 ZrO_2 陶瓷材料 (TSCZ), 并对其相稳定性、热膨胀系数、力学性能和抗烧蚀性能进行了研究。结果表明, TSCZ 陶瓷材料在 1500 °C 下经长时间热处理后, 仍然保持稳定的 t' 相, 具有良好的高温相稳定性; 随着 TiO_2 掺量的增加热膨胀系数、硬度、断裂韧性和抗烧蚀性能降低, 杨氏模量增加。与传统的 YSZ 相比, TSCZ 陶瓷材料的热膨胀系数相当, 但更耐高温, 力学性能和抗烧蚀性能较优。以上结果表明, TSCZ 陶瓷可能是一种很好的 TBC 应用材料。

参考文献:

- [1] 王枚, 冯彦铭, 陈依. 热障涂层材料研究进展[J]. 机电工程技术, 2021, 50(12): 333-336.
WANG Mei, FENG Yanming, CHEN Yi. Research progress of thermal barrier coating materials[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2021, 50(12): 333-336.
- [2] PADTURE N P. Advanced structural ceramics in aerospace propulsion[J]. Nature Materials, 2016, 15(8): 804-809.
- [3] GAO L H, GUO H B, GONG S K, et al. Plasma-sprayed $\text{La}_2\text{Ce}_2\text{O}_7$ thermal barrier coatings against calcium-magnesium-alumina-silicate penetration[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2014, 34(10): 2553-2561.
- [4] GUO L, LI M Z, ZHANG Y, et al. Improved toughness and thermal expansion of non-stoichiometry $\text{Gd}_{2-x}\text{Zr}_{2+x}\text{O}_{7+x/2}$ ceramics for thermal barrier coating application[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2016, 32(1): 28-33.
- [5] GUO L, ZHANG C L, XU L M, et al. Effects of TiO_2 doping on the defect chemistry and thermo-physical properties of Yb_2O_3 stabilized ZrO_2 [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2017, 37(13): 4163-4169.
- [6] 王进双, 陈路遥, 刘冰, 等. Dy_2O_3 改性 YSZ 相稳定性及熔盐腐蚀行为[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2020, 33(1): 112-117.

- WANG Jinshuang, CHEN Luyao, LIU Bing, et al. Phase stability and molten salt corrosion behavior of YSZ modified by Dy_2O_3 [J]. *Journal of Xinyang Normal University(Natural Science Edition)*, 2020, 33(1): 112-117.
- [7] ZHAO M, PAN W. Effect of lattice defects on thermal conductivity of Ti-doped, Y_2O_3 -stabilized ZrO_2 [J]. *Acta Materialia*, 2013, 61(14): 5496-5503.
- [8] LIMARGA A M, SHIAN S, LECKIE R M, et al. Thermal conductivity of single- and multi-phase compositions in the ZrO_2 - Y_2O_3 - Ta_2O_5 system[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2014, 34(12): 3085-3094.
- [9] ZHENG Q, WU F S, CHEN L, et al. Thermophysical and mechanical properties of YTao_4 ceramic by niobium substitution tantalum[J]. *Materials Letters*, 2020, 268: 127586.
- [10] ZHAO M, REN X R, PAN W. Effect of lattice distortion and disordering on the mechanical properties of titania-doped yttria-stabilized zirconia[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2014, 97(5): 1566-1571.
- [11] PITEK F M, LEVI C G. Opportunities for TBCs in the ZrO_2 - $\text{YO}_{1.5}$ - $\text{TaO}_{2.5}$ system[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2007, 201(12): 6044-6050.
- [12] LOGHMAN-ESTARKI M R, SHOJA RAZAVI R, EDRIS H, et al. Comparison of hot corrosion behavior of nanostructured ScYSZ and YSZ thermal barrier coatings[J]. *Ceramics International*, 2016, 42(6): 7432-7439.
- [13] JIANG K, LIU S B, XI W J. Effect of high-temperature aging on the fracture toughness of 40 mol% ceria-stabilized zirconia[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2015, 98(1): 331-337.
- [14] TABATABAEIAN M R, RAHMANIFARD R, SEYED JALILI Y. The study of phase stability and thermal shock resistance of a Scandia-Ceria stabilized zirconia as a new TBC material[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2019, 374: 752-762.
- [15] WANG J S, SUN J B, YUAN J Y, et al. Phase stability, thermo-physical properties and thermal cycling behavior of plasma-sprayed CTZ, CTZ/YSZ thermal barrier coatings[J]. *Ceramics International*, 2018, 44(8): 9353-9363.
- [16] ZHOU X, XU Z H, FAN X Z, et al. $\text{Y}_4\text{Al}_2\text{O}_9$ ceramics as a novel thermal barrier coating material for high-temperature applications[J]. *Materials Letters*, 2014, 134: 146-148.
- [17] 姜涛, 宋希文, 谢敏, 等. $\text{Sm}_2(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)_2\text{O}_7$ 陶瓷材料的结构及热物理性能[J]. *装备环境工程*, 2019, 16(1): 47-52.
- JIANG Tao, SONG Xiwen, XIE Min, et al. Structure and thermophysical properties of $\text{Sm}_2(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)_2\text{O}_7$ ceramic materials[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2019, 16(1): 47-52.
- [18] WANG J S, CHEN M D, XU Y Y, et al. Thermal and mechanical properties of Sc_2O_3 - CeO_2 co-stabilized zirconia ceramic as promising thermal barrier coating material[J]. *Ceramics International*, 2021, 47(23): 32874-32881.
- [19] 谢敏. Er_2O_3 掺杂新型热障涂层材料结构及性能研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2020.
- XIE Min. Structure and properties of Er_2O_3 doped new thermal barrier coating materials[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2020.
- [20] VASSEN R, CAO X Q, TIETZ F, et al. Zirconates as new materials for thermal barrier coatings[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2000, 83(8): 2023-2028.

责任编辑:张钰